

Е. А. Федосов, С. Л. Гольдштейн, И. А. Диомидов

МЕТОД И МОДЕЛЬ ОЦЕНКИ ТОЛЩИНЫ ГЕМАНГИОМ

Представлена системно-структурная, концептуальная, алгоритмическая, математическая и экспериментальная модель оценки толщины гемангиомы.

Ключевые слова: *гемангиома, толщина гемангиомы, лазерная хирургия, диагностика.*

The system and structural, conceptual, algorithmic, mathematical and experimental model of hemangioma thickness estimate is presented.

Keywords: *hemangioma, thickness of hemangioma, diagnostics.*

Гемангиома — это доброкачественная опухоль, развивающаяся из кровеносных сосудов; устраняемая агрессивной терапией (лекарственные препараты), бескровной и кровавой хирургией. Бескровная осуществляется с помощью лазерной технологии. При ее планировании и реализации важно знать толщину, которая зрительно не видна. Для ее определения могут использоваться различные сканеры: УЗИ, КТ, МРТ, ПЭТ [1–5]. Перед проведением процедуры лечения необходимо определить глубину залегания новообразования относительно поверхности тела. В зависимости от полученных данных (толщина опухоли) хирург принимает решение по выбору способа «удаления» гемангиомы. Очень часто хирург применяет вариации неинвазивных сканеров для уточнения толщины гемангиомы [6], т. к. не всегда с такой задачей может справиться только один вид устройства.

В данной статье поставлена и решена задача по определению толщины гемангиомы криогенным методом с помощью пакета моделей. Проведен эксперимент, который позволяет детерминировать размерность новообразования без применения неинвазивных сканеров.

Концептуальная модель

Метод определения толщины гемангиомы — это последовательность процедур, обладающих *функциями* криовоздействия на гемангиому, снятия откликов после такого воздействия, обработки результатов *путем* натурного и компьютерного экспериментов *на основе* устройств: весов, курвиметра, термометра, холодильника, резака, кондуктора, манипулятора, компьютера; *направленный* на удовлетворение потребности хирурга в знании и определении толщины гемангиомы; *с целью* выбора оптимальных характеристик лазера.

Системно-структурная модель системы оценки толщины гемангиом

В качестве прототипа системы оценки толщины гемангиом (СОТГ) взята компиляция подсистем [7]: 1 — прозекторская [1], 2 — ультразвукового исследования [2],

3 — компьютерной томографии [3], 4 — магнитно-резонансной томографии [4], 5 — позитронно-эмиссионной томографии [5], 6 — управления, 7 — оценки результата, 9 — криометрическая, 8, 10 — интерфейсов. Системно-структурная модель (рис. 1.) отражает развитие прототипа за счет введения новых подсистем 9 и 10 и модернизации двух существующих подсистем 6 и 7.

Криометрическая подсистема 9 предлагается в составе инструментов: весы, курвиметр, термометр, холодильник, резак, кондуктор, манипулятор, компьютер. Блок 7 производит оценку, которая идет на вход условия: «Результат удовлетворяет?». Блок 6 контролирует функционирование СОТГ.

СОТГ функционирует по следующему алгоритму. На входе — ситуация с неизвестной толщиной гемангиомы и запрос на развитие СОТГ. Затем открываются циклы по задачам и ресурсам. Начинается первое распараллеливание, в теле которого работают блоки (подсистемы) [1–5] прототипа. После чего блок 7 оценивает результат, например, по затратности. При негативной оценке подключаются подсистемы 9 и 10, выходы с которых поступают в начало распараллеливания. Старший параллелизм поддерживается блоком 6. После закрытия циклов на выходе фиксируют результаты, отчетность и опыт.

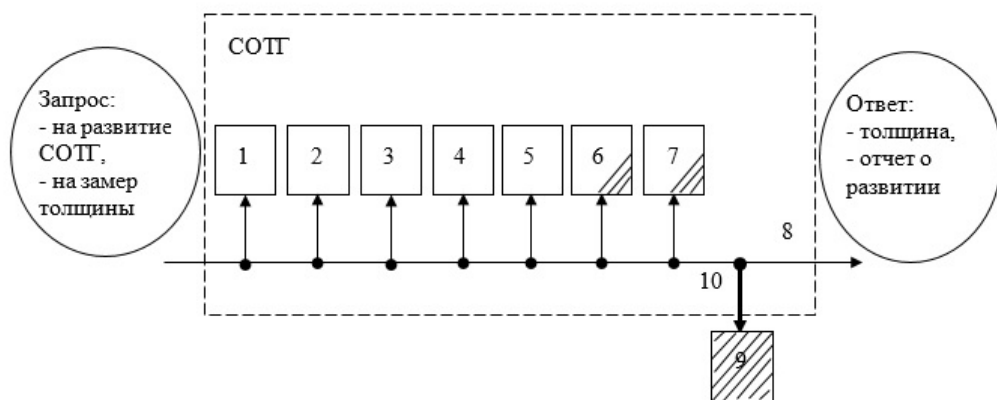


Рис. 1. Системно-структурная модель СОТГ по компилятивному прототипу [1–5] и предлагаемому решению: фон, уголки, жирная стрелка

Алгоритмические модели

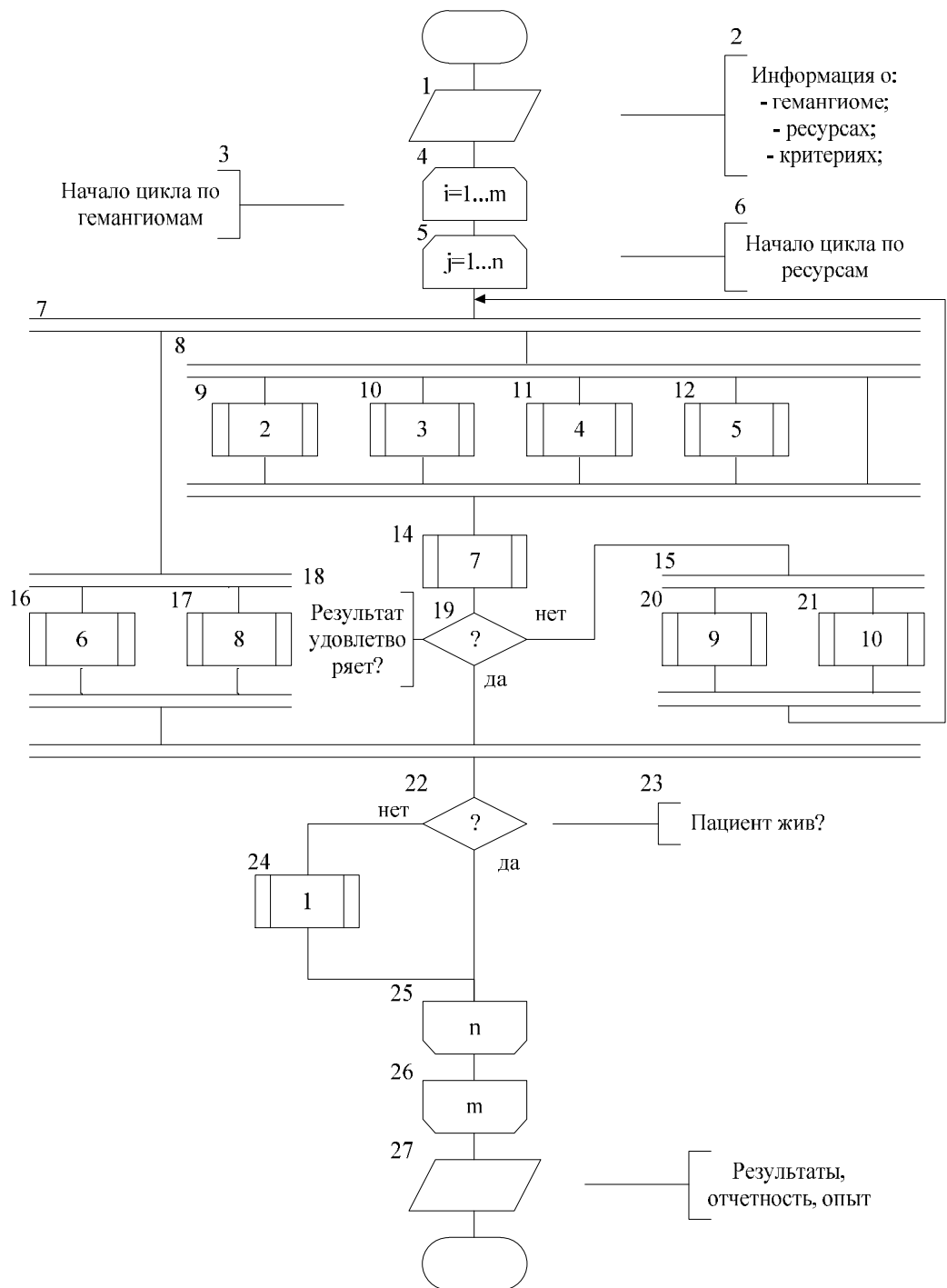


Рис. 2. Алгоритмическая модель СОТГ

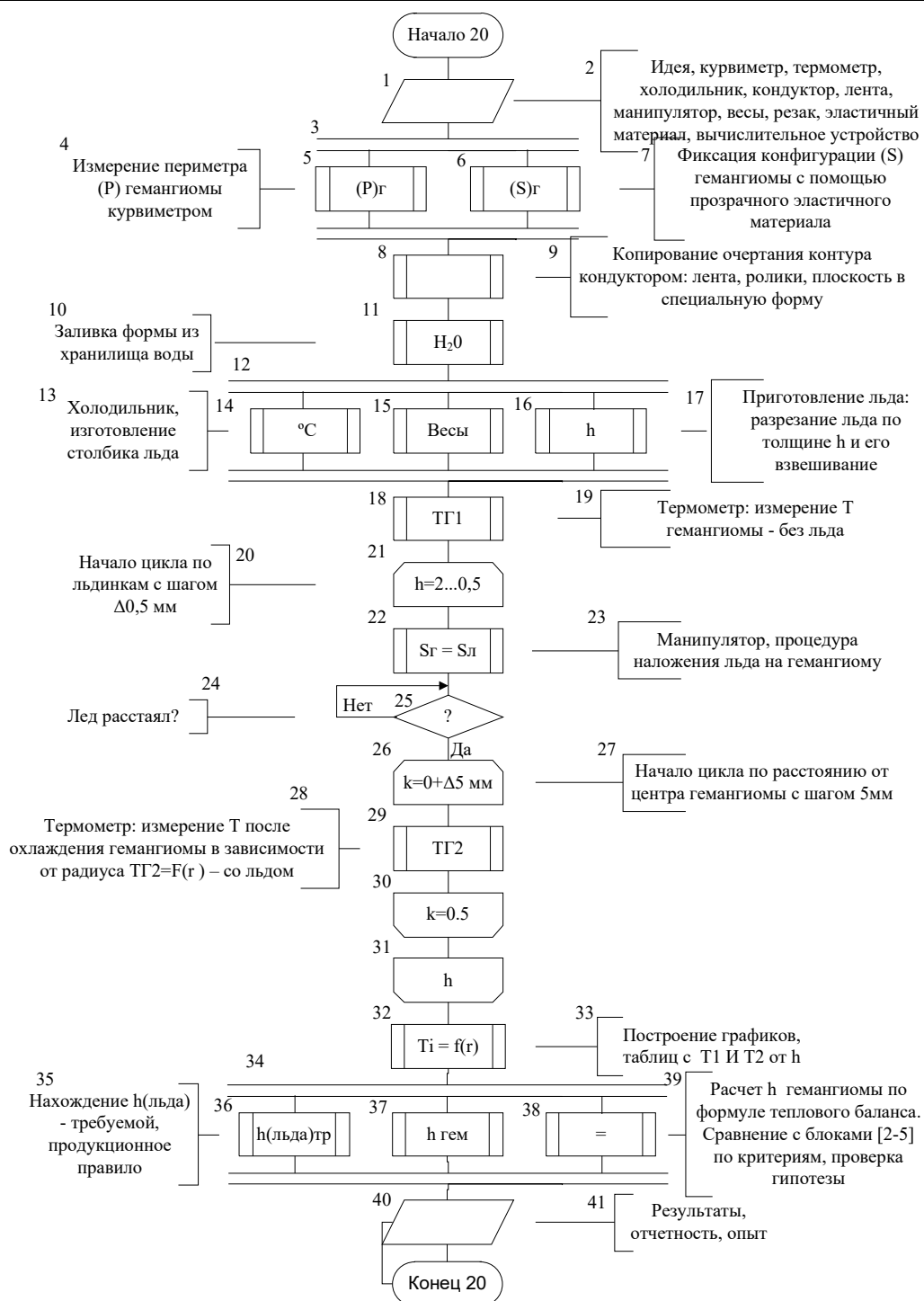


Рис. 3. Алгоритмическая модель криометрической подсистемы COTG

Математическая модель

Идея — возможность определения скрытой толщины наружной гемангиомы за счет криогенного эффекта и модели теплового баланса.

Дано: наружная гемангиома, удельная теплота плавления λ и плотность ρ_{ice} льда, теплоемкость c , плотность ρ_{gem} и температура T тела.

Требуется: синтезировать математическую модель метода определения толщины гемангиомы [8], разобраться с размерностями, оценить порядки величин, проверить адекватность модели.

Ведущая гипотеза по модели: вся теплоемкость льда расходуется только на гемангиому, поскольку ее температура выше температуры тела.

Алгоритм эксперимента (см. рис. 3): определение периметра гемангиомы с помощью курвиметра; копирование периметра кондуктором с роликом и резиновым кольцом; изготовление по периметру столбика льда из воды; нарезка столбика на пластины толщиной 2...0,2 мм; измерение температуры гемангиомы; проведение серии экспериментов с растоплением пластинок льда гемангиомой до полного их расставания с фиксацией радиальной зависимости температуры тела для разных толщин льда; расчет площади гемангиомы S_{gem} ; построение температурной зависимости (рис. 4.); выбор оптимальной толщины льда h_{ice} . Оптимальной считают ту толщину льда h_i , которая соответствует сигмоидной зависимости $f_i = |h_{36,6_i} - h_{ice_i}|$, не выходящей за периметр гемангиомы по ее радиусу:

$$\begin{aligned} & \text{if } |h_{36,6_i} - h_{ice_i}| \rightarrow 0 \text{ then } h_{ice_i} = h_{36,6_i} \\ & \text{else if } |h_{36,6_i} - h_{ice_i}| > 0 \text{ then } h_{ice_i} \uparrow \\ & \text{else if } |h_{36,6_i} - h_{ice_i}| < 0 \text{ then } h_{ice_i} \downarrow \end{aligned} \quad (1)$$

$$h_{gem} = \frac{\lambda \rho_{ice} h_{ice} S_{ice}}{c \Delta T \rho_{gem} S_{gem}} \quad (2)$$

Проверка адекватности модели проведена методом сравнения с УЗИ-данными.

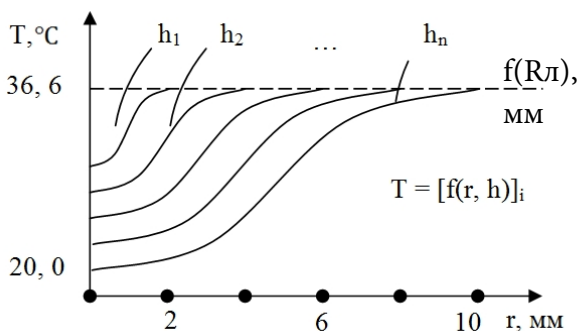


Рис. 4. Графическая модель эксперимента

Эксперимент

Эксперимент проводили в НПЦ Бонум. Использовали следующие инструменты и оборудование: линейка, прозрачный мягкий полиэтилен, уплотненный твердый полиэтилен, скотч, шприц, вода, соль, маркер, подставка, пипетка, штангенциркуль, ножницы, марля, ЭВМ.

Приготовление приспособлений для льда (блоки 1–9 на рис. 3). На гемангиому накладывали прозрачный полиэтиленовый материал больший по площади, чем сама опухоль; с помощью маркера очерчивается контур; очерченный контур вырезается с помощью ножниц; на твердый уплотненный полиэтиленовый материал (достаточно плотный чтобы не изгибаться при тряске, и чтобы можно было использовать обычные ножницы, способные вырезать из него заготовки) накладывается вырезанный контур; затем он вновь очерчивается маркером; вырезается очерченный контур на плотном полиэтилене; операция повторяется столько раз, сколько планируется создать пластинок льда (в данном случае используются 4 заготовки из твердого полиэтилена для 3-х пластинок льда); для каждой заготовки вырезается полиэтиленовый контур большей площади — заплатка (заплатка необходима для того, чтобы после приготовления льда при его отделении от заготовок, сам лед не сломался, поэтому используется промежуточный слой, который просто служит для более мягкого и надежного, не повреждающего лед, способа отделения льда от заготовок), чем сама заготовка (такая площадь полиэтилена должна полностью охватить заготовку, и после охвата иметь возможность соединиться на уровне нескольких сантиметров выше нее).

Приготовление льда (блоки 10–17 на рис. 3). Для определения толщины льда используются цилиндрические проволоочки определенной толщины (толщина измеряется штангенциркулем), задаваемой в зависимости от первичной оценки толщины гемангиомы по отношению к криометрическому методу: охлаждение гемангиомы льдом; каждая проволоочка изгибается один раз для того, чтобы разделить заготовки (тем самым задав расстояние между ними — будущую толщину пластинки льда); каждая проволоочка имеет разные толщины соответственно для каждой будущей пластинки льда; проволоочка находится между заготовками, однако, т. к. верхняя заготовка охватывается полиэтиленовой заплаткой, то проволоочка находится между заплаткой и заготовкой; каждая заготовка ставится на заплатку, заплатка охватывает заготовку и своими краями соединяется выше заготовки; при расположении снизу вверх и при взятии в расчет, что необходимо создать только три пластинки льда используется следующая схема по порядку: заплатка, заготовка, проволоочка 1, заплатка, заготовка, проволоочка 2, заплатка, заготовка, проволоочка 3, заплатка, заготовка; причем охват 1-ой заплаткой идет снизу вверх и соединяется с последней заплаткой, охват 2-й и 3-й идет снизу вверх и соединяется с 4-й заплаткой; таким образом, все охватывающие заплатки соединяются скотчем чуть выше всей конструкции; после чего вся конструкция дополнительно охватывается скотчем по всей ширине; для приготовления самого льда используется

вода, которая заливается в те промежутки, в которых находятся проволоочки; вода заливается с помощью шприца, проколов конструкцию в месте «слоя» проволочек; затем конструкция еще раз залатывается скотчем, закрывая дырку; количество воды может быть рассчитано исходя из объема, образовавшегося в «слое» проволоочки между заготовками и заплатками; объем рассчитывается по двум составляющим — площадь и высота; площадь вычисляется по исходным данным очерченного контура гемангиомы; высота берется как высота конкретной проволоочки; объем рассчитывается как площадь, умноженная на высоту минус объем проволоочки, равный ее длине, умноженной на толщину и умноженный на площадь поперечного сечения как числа π на диаметр сечения, деленный пополам, чей результат возводится в квадрат и умножается на число π ; полученный объем воды набирается с помощью пипетки, чей капилляр соответствует полученной из него капле порядка 0,05 мл на одну каплю; исходя из пропорции капли и объема, вычисленный объем воды набирается в шприц и, затем, заполняет резервуар будущей пластинки льда; после чего с помощью скотча проделанные дырки зарываются, а конструкция помещается на подставку с солью (для того чтобы охлаждение было быстрее); подставка помещается в морозильное отделение на время полной заморозки пластинок льда.

Измерение промежуточных данных (блоки 18–33 на рис. 3). Перед проведением эксперимента охлаждения гемангиомы, необходимо измерить температуру гемангиомы. Такая температура будет принята за константу для конкретного пациента (температура условного центра), обозначенная как $T_1 = 37,4 \pm 0,3$ °C, где 0,3 — погрешность измерительного прибора — инфракрасного датчика. Толщины определены заранее с помощью штангенциркуля: 0,3; 0,5; 0,7 мм, соответственно. Далее взято условное направление радиуса-луча с точкой начала в условной центре гемангиомы. Измерено расстояние по этому радиусу из начальной точки до периферии, равное 15 мм. Также за константы приняты некоторые величины в формулах теплоемкости тела и теплоты плавления льда:

$$\lambda = 33 \cdot 10^4 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$c_{\text{крови}} = 3645 \dots 3770 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$c_{\text{тела человека}} = 0,83 \text{ ккал}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}) = 3470 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}),$$

$$\rho_{\text{льда}} = 0,917 \text{ кг}/\text{м}^3,$$

$$\rho_{\text{гем(крови)}} = 1060 \text{ кг}/\text{м}^3.$$

Кроме того, измерена температура за периферией гемангиомы, которая меньше нее и составляет в среднем $T = 34,4$ °C, что является нормальной температурой в данной области (голова). Однако на периферии гемангиомы и смежных участков поверхности тела температура имеет промежуточные показания. Данные промежуточных данных измерения представлены в табл. 1.

Таблица 1

Зависимость температуры от радиуса (без охлаждения)

$T, ^\circ\text{C}$	37,4	37,0	36,8	36,1	35,5	34,9	34,4
$R (S_{гем}), \text{мм}$	0	5	10	15	20	25	30

Ход работы (блоки 32–41 на рис.3). Готовая пластинка льда кладется на гемангиому до полного ее таяния; марлей убирается лишняя вода (чтобы при последующем измерении ИК датчиком не случилось погрешности при прохождении луча и попадании его на отражающую поверхность в виде оставшихся капель стаявшей воды); начинается измерение температуры по тому же радиусу с тем же шагом; после проведения серии таких экспериментов все повторяется с другими пластинками. Результаты зафиксированы в табл. 2, которая определяет изменение температуры по радиусу, причем для каждой толщины пластинки.

Таблица 2

Зависимость температуры T от радиуса R (после охлаждения), $^\circ\text{C}$

$R (S_{гем}), \text{мм}$	0	5	10	15	20	25	30
Толщина льда, мм							
0,3	25	26,6	34,4	36,4	37,4	37,4	37,4
0,5	22,5	22,5	23,9	33,8	37,1	37,4	37,4
0,7	17,4	17,5	17,4	20,9	29,9	36,4	37,4

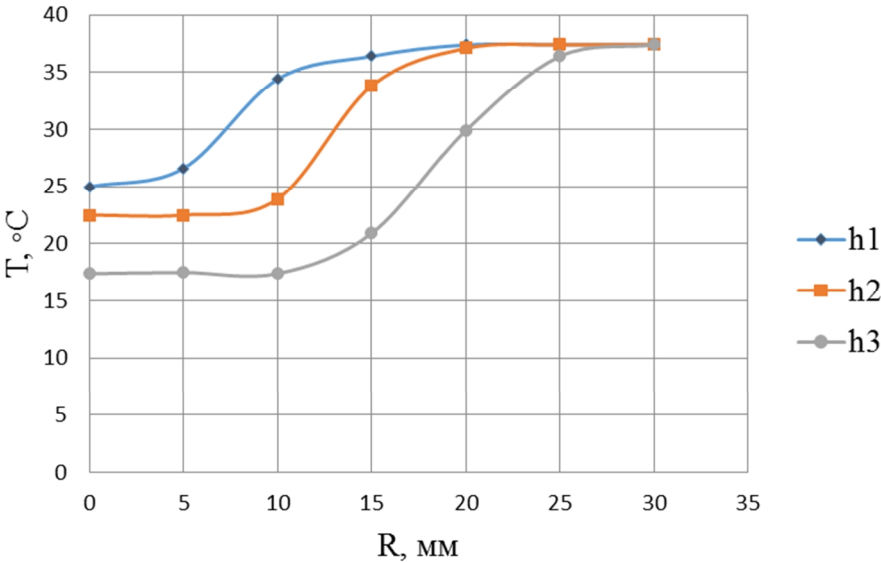


Рис. 5. Радиально-температурная зависимость:

T — температура, R — радиус из центра гемангиомы, h_1 — сигмоида, соответствующая толщине льда 0,3 мм, h_2 — сигмоида, соответствующая толщине льда 0,5 мм, h_3 — сигмоида, соответствующая толщине льда 0,3 мм

Пакет формул для расчета толщины гемангиомы:

$$Q_{пл} = \lambda \Delta t_{льда}, Q_{тепл} = mc \Delta T,$$

$$Q_{пл} = Q_{тепл}, \lambda \Delta t_{льда} = mc \Delta T,$$

$$\lambda \Delta \rho_{льда} h_{льда} S_{льда} = c \Delta T r_{гем} h_{гем} S_{гем},$$

$$h_{гем} = \frac{\lambda \rho_{льда} h_{льда} S_{льда}}{c \Delta T \rho_{гем} S_{гем}} = \frac{\lambda \rho_{льда} h_{льда}}{c \rho_{гем} \Delta T}$$

Справочные данные: λ , $c_{крови}$, $c_{тела человека}$, $\rho_{льда}$, $\rho_{гем(крови)}$ см. выше.

Расчет:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = 37,4^\circ\text{C} - 22,5^\circ\text{C} = 14,9^\circ\text{C},$$

$$h_{льда} = 0,0005 \text{ м} = 0,5 \text{ мм},$$

$$h_{гем} = \frac{\lambda \rho_{льда} h_{льда}}{c \rho_{гем} \Delta T} = \frac{33 \cdot 10^4 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0,917 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 0,0005 \text{ м}}{3700 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 1060 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \cdot 14,9^\circ\text{C}} = 0,002589 \text{ м} = 2,5 \text{ мм}.$$

Результаты

В данной статье поставлена и решена задача создания метода и модели оценки толщины гемангиомы. Построены: концептуальная модель; системно-структурная модель; алгоритмическая модель; математическая модель.

Проведен эксперимент.

Выводы

Созданы предпосылки для апробации модели. Проведенный эксперимент подтверждает гипотезу.

Литература

1. Чалисов И. А., Хазанов А. Т. Руководство по патологоанатомической диагностике важнейших инфекционных заболеваний человека. М.: Медицина, 1980. 300 с.
2. Бубнов Р. В. Ультразвуковой контроль с помощью интегрированного применения трехмерных технологий // Международный медицинский журнал. 2011. № 2. С. 98–104.
3. Кармазановский Г. Г. Современное использование компьютерных томографов. М.: Издательский дом Видар-М. 2005. 124 с.
4. Синицин В. Е., Терновой С. К. Магнитно-резонансная томография в новом столетии // Радиология-практика. 2005. № 1(4). С. 23–29.
5. Гранов А. М. Позитронная эмиссионная томография. СПб.: Фолиант, 2008. 368 с.
6. Samand S. A., Maimunah A., Zulfiqar A., Zaharah M. Ultrasuond and computed tomographic appearances of large hepatic cavernous hemangiomas // Med J. Malasia. 1995. № 1(4). P. 82–86.
7. Федосов Е. А., Гольдштейн С. Л., Диомидов И. А. Структура и функционирование системы оценки толщины гемангиом // Тезисы I Междунар. молодежн. научн. конф., посвященной 65-летию основания Физико-технологического института. Екатеринбург: УрФУ, 2014. С. 99–100